

1. Введение. Актуальность и практическая значимость компьютерного моделирования кристаллизационных трещин

Необходимость развития российских систем компьютерного инженерного анализа в приложении к литейным технологиям и литым деталям требует направленной деятельности по совершенствованию математических моделей анализируемых процессов с целью обеспечения точности расчетов и надежности прогнозирования критических состояний. Стремление к достоверности компьютерных прогнозов требует тщательной проверки всех этапов формирования программных продуктов. Начальный этап такой работы является аналитическим и заключается в подробном описании принципиально важных процессов и возможных состояний, в выделении основных и лимитирующих эффектов, на базе которых можно четко сформулировать физические модели поведения технических объектов. Физические модели, в свою очередь, можно представить в виде системы уравнений, включающей собственно дифференциальные уравнения, описывающие основные процессы, а также граничные и начальные условия. Полная система уравнений очерчивает более или менее достоверную математическую модель объекта, которую на заключительном этапе работы можно с привлечением оптимальных численных методов оформить в виде пользовательской прикладной программы.

Данная статья включает анализ проблемы и результаты вычислительного эксперимента в рамках первого, актуального этапа обозначенной последовательности действий и нацелена на то, чтобы систематизировать основные явления, выявить существенные факторы и сформулировать критерии для прогнозирования кристаллизационных трещин в стальных отливках.

Кристаллизационные трещины снижают служебные характеристики литых деталей, работающих в условиях динамического и циклического нагружения. Такие трещины являются существенной проблемой для малолегированных сталей, причем эта проблематичность возрастает в связи с использованием неподатливых форм и стержней для изготовления отливок, а также – с уменьшением проектируемой толщины стенок литых деталей [1].

В настоящее время большой интерес представляет количественная оценка процессов образования кристаллизационных трещин и их реализация в математические модели, а затем – в инженерные программные продукты общего пользования. К сожалению, на текущий момент отсутствует многофакторная математическая модель всех процессов, обуславливающих формирование и развитие трещин в отливках. Отсутствие полной математической модели процессов препятствует развитию программных средств, поддерживающих вычислительный эксперимент с учетом данного явления.

2. Зарождение и развитие кристаллизационных трещин

Ограничим понятие собственно кристаллизационных трещин, выделив их из класса литейных трещин. Строго говоря, трещины могут образоваться в остывающей отливке при любых температурах, если в текущий момент времени возникают благоприятные для этого условия. Но в зависимости от температуры различными будут микро-



механизмы их образования. В практике литья по внешним признакам идентифицируют горячие и холодные трещины. Горячие трещины имеют сильно окисленные стенки, проходят извилистым путем по границам зерен, имеют в разных точках своей длины различную ширину и располагаются в участках отливки, затвердевающих в последнюю очередь [2]. Холодные трещины имеют блестящие или слабо окисленные стенки, примерно одинаковую толщину в разных точках своей длины и располагаются в местах максимальной концентрации термических напряжений. Такая классификация трещин по внешним признакам не является однозначной с точки зрения моделирования процессов их образования.

Горячие трещины зарождаются вблизи температуры солидус и могут интенсивно развиваться в высокотемпературном интервале, когда прочностные и пластические свойства стали очень низки [3]. В частности, зарождение трещин при температурах несколько выше точки солидус обусловлено процессами, которые происходят в двухфазной зоне фронта кристаллизации отливки. Акцентируем внимание на таких трещинах, определим их по температурному интервалу образования как собственно кристаллизационные трещины, то есть такие горячие трещины, которые образуются в кристаллизующемся металле выше точки солидус. Итак, кристаллизационные трещины зарождаются и развиваются в эффективном интервале кристаллизации на завершающей стадии, когда растущие кристаллиты образуют жесткий каркас с распределенными необширными зонами расплава, при этом металл теряет присущую расплаву повышенную текучесть и склонен к хрупкому, межкристаллитному разрушению. Модели образования и развития кристаллизационных трещин должны учитывать иницирующую роль жидких прослоек в локальном разрушении металла на заключительном этапе затвердевания.

Обобщим представления о микромеханизмах образования трещин при повышенных температурах. Охлаждение металла в интервале от ликвидуса до солидус вызывает структурно-фазовые превращения, которые можно разделить на два стадии.

1) На первой стадии, вблизи точки ликвидус, объем твердой фазы в кристаллизующемся металле мал, и двухфазный металл в целом обладает основным свойством жидкой среды – способностью течь и свободно изменять форму. На начальной стадии кристаллизации металл легко меняет форму без разрыва и деления единого объема на изолированные части; под действием гравитации, давления или разности температур двухфазный металл может перемещаться внутри полости, при этом в движущемся металле твердые кристаллиты полностью разделены жидкой фазой. В зависимости от типа сплава жидкотекучесть двухфазного металла сохраняется при снижении объема жидкой фазы вплоть до 20-40%. Задавая зависимость предельных свойств металла от температуры при оценке напряжений и деформаций в затвердевающей отливке, следует назначить нулевую прочность и практически неограниченную пластичность для двухфазного металла на первой стадии кристаллизации вблизи точки ликвидус.

2) На второй стадии, вблизи точки солидус, когда в результате охлаждения достигается критический объем твердой фазы и происходит срастание первичных кристаллитов в жесткий твердый каркас, двухфазный металл переходит в так называемое твердо-жидкое состояние и становится хрупким. С появлением жесткого каркаса в той области кристаллизующегося металла, где скорость охлаждения выше по сравнению с другими объемами, начинается линейная усадка отливки. Линейная усадка двухфазного металла происходит в результате обычного термического сжатия кристаллов твердой фазы.

Часть интервала кристаллизации между температурой начала линейной усадки и солидусом называют эффективным интервалом кристаллизации. Именно в этом интер-



вале формируются усадочные дефекты в виде микропор и кристаллизационные трещины.

Интенсивное развитие зародившихся кристаллизационных трещин может продолжаться после полного затвердевания металла вплоть до температуры ниже точки солидус на 50-100 градусов. Вместе с тем, образование микротрещин не предопределяет однозначно их развитие до фатальных макроразрушений. Интенсивное развитие микротрещин до макроразрушений может быть инициировано в процессе дальнейшего охлаждения при более низких температурах или значительно позже по времени, когда к литой детали будут приложены эксплуатационные нагрузки, и вдруг обнаружится, что разрушающая нагрузка или срок службы детали меньше ожидаемой величины.

Процессы локального разрушения отливок в результате образования и развития трещин можно описать с позиций механики сплошных сред, но более точным будет описание, учитывающее структурные преобразования.

3. Модели образования кристаллизационных трещин с учетом структуры

В структурно-чувствительных моделях разрушения кинетика структурных изменений при формировании трещин предполагает разделение локальных процессов разрушения на две стадии: 1) структурно обусловленное образование зародыша трещины и 2) дальнейшее развитие трещины, чувствительное к кристаллографической, зеренной и фазовой структуре металла.

В твердо-жидком состоянии критерием прочности жестких каркасов с различной микроструктурой может быть количество и общая площадь стыков между зернами, а также возможная текстура – преимущественная кристаллографическая направленность растущих зерен. Микроструктура влияет на прочностные и пластические характеристики двухфазного металла. С уменьшением размера зерен пластичность твердо-жидкого металла возрастает, что объясняется ведущей ролью межзеренных механизмов деформации в твердо-жидком состоянии. Чем более мелкое и равноосное зерно формируется в микроструктуре, тем более благоприятные условия создаются для развития деформации по механизму граничного проскальзывания зерен без изменения их формы. Переход от равноосной структуры к столбчатой может существенно снизить пластичность, что объясняется меньшими возможностями для поворота столбчатых кристаллов по сравнению с равноосными и уменьшением числа поверхностей, по которым смещаются соседние зерна.

Прочность твердо-жидкого металла монотонно возрастает от температуры начала линейной усадки, выше которой прочность равна нулю, до точки солидус, так как с уменьшением объема жидкой фазы количество стыков зерен и суммарная контактная площадь увеличиваются. При охлаждении ниже точки солидус затвердевают жидкие включения и прослойки между кристаллитами, что приводит к скачкообразному увеличению прочности металла при переходе из твердо-жидкого состояния в твердое.

Повышению прочности металла в твердо-жидком состоянии способствуют следующие структурные факторы: разветвленность дендритов; дисперсность и прерывистость легкоплавкой составляющей, распределенной в межкристаллитном пространстве; малое количество эвтектики; малый размер зерен.

Усадка твердой фазы, которая представляет собой скачкообразное увеличение плотности сплава и снижение его объема при фазовом переходе из жидкого состояния в твердое, сопровождается растяжением остатков расплава, заполняющего пространство между кристаллитами в двухфазной зоне. Такое всестороннее растяжение жидкой фазы в пределах двухфазной зоны увеличивается по мере роста твердой фазы и образует перепад давления в расплаве с наибольшим градиентом у поверхности растущих кристал-



литов. Перепад давлений, обусловленный внутренними процессами, вызывает течение расплава в сторону фронта кристаллизации. Это явление называют фильтрацией расплава. За счет фильтрации, например, жидкий металл может просачиваться в междендритное пространство, ограниченное поверхностями сложной геометрической формы. Таким образом осуществляется компенсация объемного сжатия на заключительной стадии кристаллизации. Если на этой стадии отсутствует подпитывание двухфазной зоны расплавом и в то же время действуют растягивающие напряжения, то создаются условия для образования микротрещины и ее развития до разрыва.

Следует отметить, что температурный коэффициент линейного расширения (сжатия) жидкой фазы больше, чем твердой; замкнутые объемы жидкой фазы внутри дендритов сокращаются при охлаждении быстрее, чем сами дендриты, и не препятствуют термическому сжатию кристаллического каркаса. Строго говоря, усадка в интервале кристаллизации вызвана не уменьшением удельного объема при фазовом превращении, а термическим сжатием кристаллов. Линейная усадка твердого каркаса в интервале кристаллизации (при отсутствии в нем напряжений) развивается по тем же законам, что и ниже солидуса.

Процессу образования кристаллизационных трещин сопутствует процесс их заживления. Большое количество вновь образовавшихся мелких наружных трещин сразу же заполняется расплавом из внутренних объемов. Можно выделить два варианта самозалечивания расплавом трещин в затвердевающих отливках: расплавом среднего химического состава под действием металлостатического давления при повышенных температурах и расплавом с более низкой точкой кристаллизации под давлением сжимающейся корки при пониженных температурах. Важную роль в последнем процессе играет эвтектика, критическое количество которой, в свою очередь, зависит от характера первичной кристаллизации и от химического состава. В рамках описанных выше моделей можно утверждать, что углеродистые стали обладают пониженной способностью к самозалечиванию трещин из-за низкой жидкотекучести вблизи солидуса и недостаточного объема эвтектики.

Образование многочисленных микротрещин приводит к снижению плотности и прочности литого металла. Структура, насыщенная микротрещинами, становится идеальной средой для развития магистральной трещины, которая проходит извилистым путем преимущественно по границам зерен, объединяя ранее образовавшиеся микротрещины. Развиваясь в твердо-жидкой структуре, такая трещина продвигается по пути наименьшего сопротивления, соединяя наиболее обширные области остаточного расплава. С большой вероятностью осевой вектор развития трещины будет параллелен градиенту температур и направлен к центру ближайшей горячей зоны. В зависимости от условий теплоотвода и расположения горячих зон в отливке возможен выход магистральной трещины в область, заполненную расплавом. Тогда магистральная трещина заполняется расплавом, и локальное разрушение залечивается.

Пластическая деформация препятствует разрыву и является альтернативой образованию кристаллизационных трещин. Деформационная способность металла в интервале кристаллизации изменяется с уменьшением объема жидкой фазы. Формоизменение двухфазного металла с большим содержанием жидкой фазы сопровождается перемещением тестообразной смеси двух фаз, в которой жидкая фаза полностью разделяет первичные кристаллы. При снижении объема жидкой фазы в кристаллизующемся металле образуется и становится все более жестким каркас твердой фазы; сплав постепенно теряет способность течь как вязкая жидкость и приобретает свойства хрупкого твердого тела. Из-за наличия жидких прослоек легко осуществляется межкристаллитное разрушение металла, причем уровень разрушающих напряжений меньше прочно-



сти твердого каркаса, поскольку прочность межкристаллитных границ ниже прочности самих кристаллитов. Интервал между температурой образования каркаса и точкой солидуса называют температурным интервалом хрупкости. В этом интервале сплав характеризуется небольшой прочностью и очень малой пластичностью.

Пластическая деформация в температурном интервале хрупкости носит межзеренный характер и осуществляется путем небольших взаимных смещений и поворотов кристаллитов либо за счет локальной деформации в местах стыка кристаллитов в твердом каркасе. Когда способность к таким взаимным перемещениям и локальным деформациям исчерпывается, происходит локальное разрушение.

Решающую роль в процессах пластической деформации в твердо-жидком состоянии играют прослойки жидкой фазы, которые обеспечивают благоприятные условия для реализации межзеренного механизма деформации. Процесс деформирования осуществляется посредством разрушения отдельных межкристаллитных контактов и одновременного образования новых. Чем больше жидкой фазы, тем больше могут развиваться взаимные смещения кристаллитов. Поэтому способность к пластической деформации вблизи температуры образования каркаса из первичных кристаллов, когда в сплаве находится от 20 до 40% жидкой фазы, выше деформационной способности металла, охлажденного до солидуса. При охлаждении двухфазного металла до солидуса, где жидкой фазы очень мало, способность к пластической деформации особенно низка. После перехода через точку солидуса, когда кристаллизуются остатки жидкой фазы, металл становится высокопластичным. При этом меняется механизм деформации: повышенная пластичность полностью затвердевшего металла обеспечивается внутривершинной деформацией.

4. Критерии образования кристаллизационных трещин в сплошной среде

Анализируя образование кристаллизационных трещин в сплошной среде, игнорируют структурные факторы и используют для прогнозирования процессов разрушения усредненные механические характеристики металла при высоких температурах.

Существует три подхода к математическому описанию кристаллизационных трещин в сплошной среде: 1) силовой, 2) деформационный и 3) энергетический. Эти подходы рассматриваются в рамках одной из двух моделей поведения металла при разрушении: линейно-упругой или упруго-пластической. Обозначенные варианты прогнозирования кристаллизационных трещин в отливках реализуются с помощью соответствующих критериев, так, силовой критерий требует расчета растягивающих напряжений, деформационный критерий учитывает хрупкость высокотемпературной композиции из твердого металла и жидких прослоек по границам, энергетический критерий оценивает энергию границ. Перечисленные критериальные параметры вычисляются согласно сформулированной модели разрушения и могут количественно оценивать возможность появления трещин.

Силовой критерий образования кристаллизационных трещин.

Силовой критерий основан на сравнении расчетных напряжений с экспериментально определенными предельными характеристиками металла. В расчете напряженно-деформированных состояний отливки с использованием компьютерной системы такое сравнение производится на каждом временном шаге в значимом температурном интервале. Значимым для образования кристаллизационных трещин является температурный интервал вблизи точки солидуса.

По природе возникновения можно выделить четыре вида внутренних напряжений в отливке: 1) *усадочные напряжения*, обусловленные неодновременным затвердеванием расплава; 2) *тепловые напряжения*, обусловленные неоднородным распределе-



нием температуры в отливке во время ее затвердевания и дальнейшего охлаждения до выбивки; 3) *механические напряжения*, возникающие из-за сопротивления более жестких стержней или формы сокращению линейных размеров отливки при затвердевании металла и при дальнейшем охлаждении отливки в форме; 4) *фазовые напряжения*, обусловленные спецификой аллотропических превращений при охлаждении сплава в твердом состоянии.

За образование кристаллизационных трещин в основном отвечают усадочные напряжения. Участки двухфазного состава, изолированные от питающей области, обладают низкой прочностью в температурном интервале хрупкости и могут быть подвержены растягивающей нагрузке. Возникшие в отливке напряжения, достигнув значения предела прочности при текущей температуре, инициируют появление трещин. Силовой подход позволяет пренебречь особенностями геометрии трещины. При таком подходе образование кристаллизационной трещины можно сформулировать как результат локального действия растягивающей нагрузки в сплошной среде с низкими механическими характеристиками.

Условие появления кристаллизационных трещин можно сформулировать через предельные напряжения:

$$\sigma \geq \sigma_{\text{предел}} ,$$

где σ – текущее вычисленное (растягивающее) напряжение в данной расчетной точке отливки на данном временном шаге; для подстановки в силовой критерий наилучшим образом подходит первое главное напряжение (*principal stress* – в английской терминологии), характеризующее максимальное растягивающее напряжение в расчетной точке;

$\sigma_{\text{предел}}$ – предел прочности стали на разрыв, измеренный на опытных образцах при той температуре, которая зафиксирована в тепловых расчетах для данной расчетной точки на данном временном шаге.

Приведенное выше условие перехода в критическое состояние, сравнивающее внутренние напряжения растяжения с предельными характеристиками материала и хорошо прогнозирующее разрушение стальных конструкций в обычных условиях эксплуатации, становится ненадежным при повышенных температурах. Предел прочности сталей даже при комнатных температурах не является однозначным параметром, поскольку зависит от многих факторов, формируемых технологическими процессами и, в частности, термической обработкой. Но еще более неоднозначными будут предельные значения прочности при повышенных температурах, когда прочность металла лимитируется состоянием зеренных границ в условиях повышенной диффузии, рекристаллизации, плавления легкоплавких включений; а выше солидуса зависит также от целого ряда свойств двухфазной композиции твердых кристаллов и жидких включений.

На практике прогнозирование кристаллизационных трещин с использованием силового критерия наталкивается на плохо преодолимое препятствие, обусловленное тем, что структура и температурный режим разрушения опытного образца и реальной отливки могут значительно различаться; соответственно, измеренные на образцах предельные характеристики стали вблизи солидуса не коррелируют надежно с аналогичными характеристиками в действительных режимах затвердевания отливки. Более того, между значениями предела прочности сплава в твердо-жидком и твердом состояниях не существует прямой корреляции. Влияние легирующих добавок, примесей, условий кристаллизации и других факторов на прочность сплава в твердо-жидком состоянии может быть противоположным влиянию их на прочность того же сплава в твердом состоянии.



Деформационный критерий образования кристаллизационных трещин.

Деформационный критерий основан на сравнении расчетной деформации с экспериментально определенными предельными значениями удлинения металла. Результатом расчета напряженно-деформированного состояния являются тензор напряжений и тензор деформаций. Шесть независимых компонент тензора для изотропного металла можно привести к эквивалентной скалярной величине в каждой расчетной точке согласно выбранной модели поведения металла. Для выявления критических деформаций в отливке выше солидуса следует использовать упругую модель поведения твердого жидкого металла в температурном интервале хрупкости, где наиболее высока вероятность зарождения кристаллизационных трещин. Формирующийся при охлаждении расплава твердый каркас в начальный момент времени достаточно пластичен за счет микроразрушений отдельных межкристаллитных контактов при взаимном смещении и мгновенного образования новых границ. По мере того, как объем жидких прослоек уменьшается, возможность реализации такого механизма пластической деформации снижается, и непосредственно вблизи солидуса двухфазный металл становится хрупким, подверженным образованию трещин.

С помощью деформационного критерия можно проследить появление и дальнейшее развитие трещин во всем температурном интервале охлаждения отливки. Введем понятие деформационной способности металла с точки зрения механики сплошных сред, подразумевая под этой характеристикой суммарную предельную деформацию, составленную из двух компонент: упругой и пластической. Максимум деформационной способности металла наблюдается в твердом состоянии вблизи солидуса (рис.1), вероятность разрушения металла при этом наименьшая. На температурной кривой деформационной способности наблюдается два спада – низкотемпературный и высокотемпературный; этим спадам соответствует повышенная вероятность образования трещин в отливках. Высокотемпературный спад деформационной способности обуславливает появление горячих трещин, низкотемпературный – холодных.

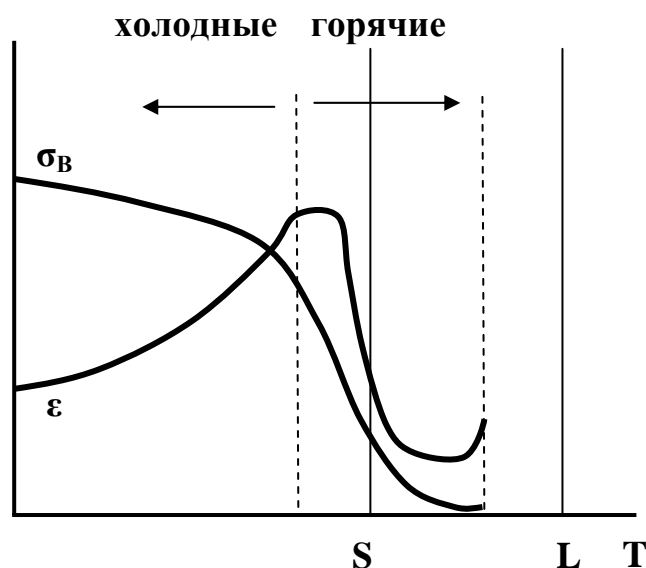


Рис.1. Обобщенная схема зависимости прочностных (σ_B) и деформационных (ϵ) свойств литейных сплавов от температуры с выделенными интервалами образования холодных и горячих трещин



Для разрушения металла выше точки солидус характерна очень малая пластическая деформация. Разрушение твердого каркаса в двухфазной области развивается, как правило, по границам зерен, ослабленным за счет прослоек жидкой фазы, и является хрупким [3]. Поскольку чуть выше солидуса сплавы разрушаются хрупко, их деформационная способность в температурном интервале хрупкости лимитируется упругой составляющей деформации, а остаточная пластическая деформация мала.

Реологические исследования [4] показывают, что в качестве характеристики деформационной способности сплавов в интервале кристаллизации в первом приближении может быть принята предельная упругая деформация. Согласно деформационному критерию трещины зарождаются в тех локальных объемах, где деформация растяжения, развивающаяся в затвердевающей отливке под действием напряжений, исчерпывает деформационную способность сплава.

Условие появления кристаллизационных трещин:

$$\varepsilon \geq \varepsilon_{\text{предел}},$$

где ε – вычисленная деформация в расчетной точке;

$\varepsilon_{\text{предел}}$ – предельная относительная деформация растяжения сплава, заданная в виде температурной функции.

Итоговая оценка образования и дальнейшего развития трещины при охлаждении должна носить комплексный характер и учитывать соотношение предельных пластических характеристик с накопленной расчетной деформацией во всем температурном интервале охлаждения. При этом каждой температуре будет отвечать своя кривая растяжения. Оценочный расчет разбивается на два этапа. Первый этап – тепловой анализ и расчет температуры во всех расчетных узлах отливки и формы (стержня) на всех заданных шагах по времени. Второй этап – расчет деформации согласно распределению температуры на каждом шаге. Накопление деформации растяжения при охлаждении посчитать достаточно просто. Алгоритм расчета предполагает суммирование деформаций при охлаждении и сравнение суммарной деформации на каждом шаге в каждой расчетной точке с предельным значением относительного удлинения при той температуре, которая зафиксирована в тепловом расчете для данной расчетной точки на данном шаге.

Решение задачи о развитии трещины требует моделирования ее границ в пространстве, и в частности, тупиковой части. Горячую трещину можно представить при математическом описании как замкнутую поверхность, ограничивающую область разрушения. Различают два основных типа трещин: с обрубленной вершиной и с закругленной. В первом случае рост трещины контролируется преимущественно ее раскрытием, и предпочтение отдают деформационному подходу. Во втором случае рост трещины определяется потоком энергии в окрестности ее вершины, ограниченной малым контуром, и применяется энергетический подход.

5. Вычислительный эксперимент и обсуждение результатов

Следует ожидать, что начальный этап образования кристаллизационных трещин осуществляется одновременно с появлением усадочных микропор, которые играют роль зародышей для микроочагов разрушения и в дальнейшем облегчают развитие трещины. Концентрацию микропор необходимо учитывать в критерии образования кристаллизационных трещин. В данной работе показано влияние усадочных дефектов на высокотемпературное разрушение отливки; для этого проведен вычислительный эксперимент с использованием компьютерной программы LVMflow (разработчик – НПО «МКМ», г. Ижевск). Программа для моделирования литейных технологий



LVMflow проводит расчет тепловых напряжений в отливке (растягивающих и сдвиговых), а также вычисляет силовой критерий образования трещин.

В вычислительном эксперименте использованы результаты натурного эксперимента по выявлению горячих трещин (рис.2) в стали, химический состав которой соответствует марке 20ГЛ. По приведенным в статье [5] размерам построены объемные геометрические модели двух тестовых отливок. В одной из отливок Т-образной формы при охлаждении появились трещины (рис.3), вторая отливка – с меньшим утолщением центральной части – не разрушилась. Сравнительный компьютерный анализ двух тестовых отливок проведен для стали 20ГЛ с критическими температурами солидус 1474°C и ликвидус 1513°C . Для обеих отливок рассчитаны температурные поля, а также тепловые напряжения и деформации при условии свободной усадки. Т-образная форма образцов с утолщением и прибылью в центральной части минимизирует сопротивление формы сокращению линейных размеров отливки при охлаждении.

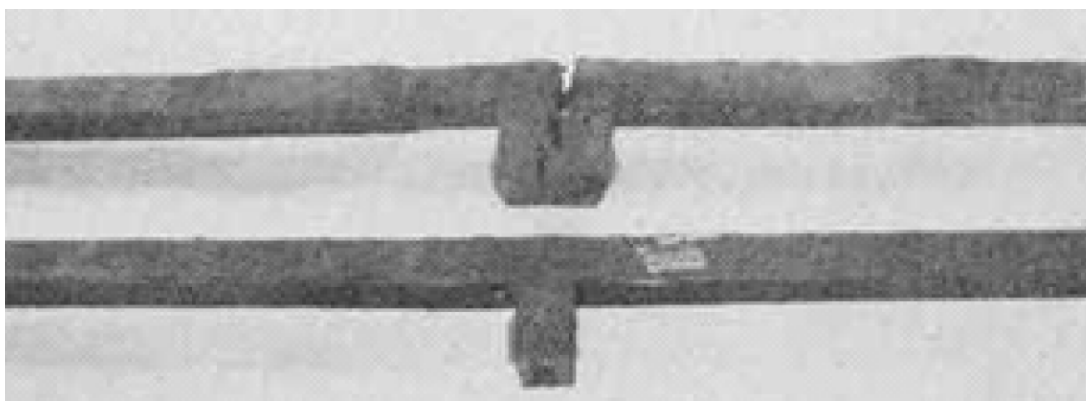


Рис.2. Исходные экспериментальные данные к верификации расчетов [5]

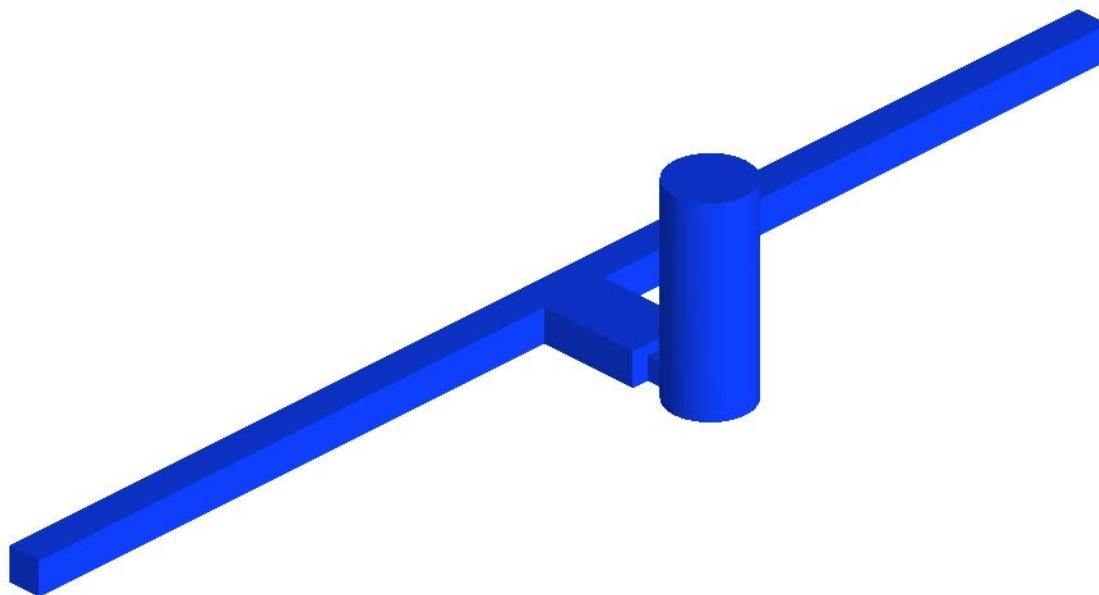


Рис.3. Объемная модель тестовой отливки



Анализ перемещений изотермы солидус (рис. 4 б) и образующихся при кристаллизации усадочных дефектов (рис. 4 в) свидетельствует о том, что повышенная концентрация усадочных дефектов способствует образованию и раскрытию трещины. Характер распределения и уровень растягивающих напряжений в обеих отливках отличаются мало (рис. 4 г). Величина расчетных напряжений при повышенных температурах соизмерима с измеренным пределом прочности стали 20Л в соответствующем температурном интервале [6]. Основное различие заключается в том, что концентрация усадочных дефектов в разрушенном образце выше, и дефекты в нем локализованы вдоль оси разрушения.

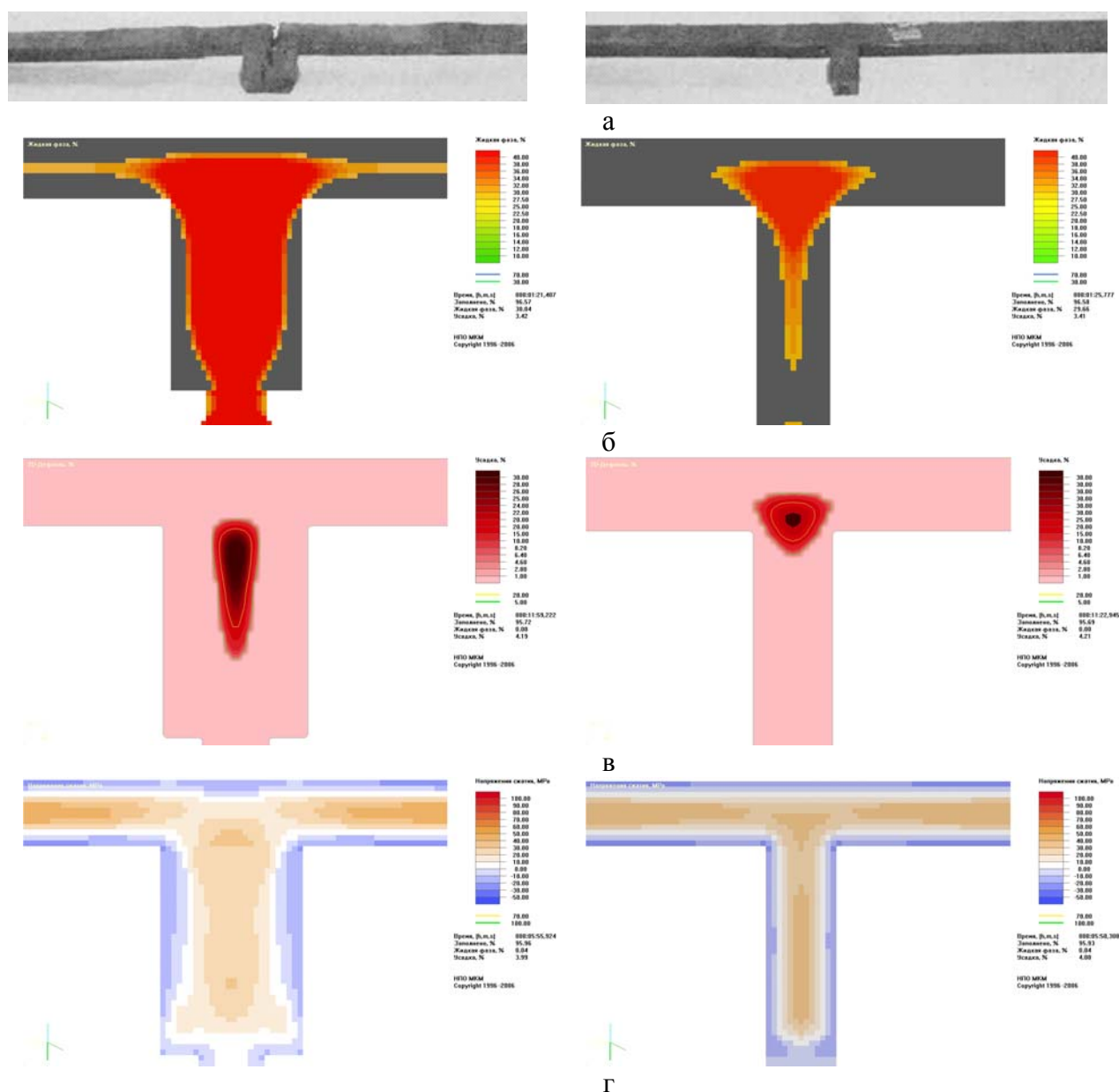


Рис.4. Результаты расчета в тестовых отливках (а) температурных полей (б), усадки (в) и растягивающих напряжений (г)



Выводы

Модельные представления о критерии горячих (в том числе и кристаллизационных) трещин находятся в постоянном развитии, и в идеале такой критерий следует формировать как многофакторный параметр. Появление трещин в остывающей отливке зависит не только от температурных полей и связанных с ними тепловых напряжений и деформаций, но и от локализации усадочной пористости. Образование и развитие кристаллизационной трещины может проходить при крайне низких напряжениях; при этом разрушение не прогнозируется теми критериями, которые базируются на общепринятых в расчетах конструкционной прочности моделях поведения сплошной среды. Важным фактором является пространственное расположение усадочных пор и обусловленное усадкой локальное снижение плотности в зоне ожидаемого разрушения.

Компьютерное моделирование литейных процессов является важным направлением развития наукоемких технологий и в итоге позволит виртуальными методами выбирать оптимальные варианты решения заводских проблем с минимальными затратами времени и материальных ресурсов.

Список литературы

1. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях. Литейное производство, 2007, №2, С.27-30.
2. Атлас литейных пороков. ЦБНТИ, 1958, т.2
3. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М.: Наука, 1966. 300 с.
4. Баландин Г.Ф., Каширцев Л.П. Реологическое исследование трещиностойкости отливок во время затвердевания. Литейное производство, 1978, №1, С.5-8.
5. Monroe C., Beckermann C. Development of a Hot Tear Indicator for Steel Castings. Material Science and Engineering: A, 2005, V.413-414, P.30-36.
6. Производство стальных отливок: Учебник для вузов / Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Вдовин К.Н. и др. / Под ред. Л.Я.Козлова. – М.: МИСИС, 2003. 352 с.

Авторы выражают благодарность НПО «МКМ» и лично Александру Генриховичу Попову за подробное обсуждение рукописи и надеются, что выполняемая работа будет полезна для дальнейшего развития модуля напряженно-деформированных состояний программного комплекса LVMFlow.

